

Електронные системы

УДК 621.391.8

А.В. Заграничний

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна.

Синтез пассивных фильтров для системы ядерного магнитного резонансу

В даній статті розглянуто методи синтезу Кауера та Форстера пасивних фільтрів для системи ядерного магнітного резонансу. Наведено переваги та недоліки отриманих схем. На основі порівняльного аналізу вказано на доцільність використання схеми, отриманої за допомогою методу Кауера по спадаючим показникам. Зауважено на необхідність зменшення кількості реактивних елементів в схемах та коригування спектрального складу напруги на виході інвертора.

Бібл. 4, рис. 5, табл. 3.

Ключові слова: зондувальний сигнал; метод синтезу; передавальна функція; пасивний фільтр; коливальний контур.

Вступ

На сьогоднішній день однією з актуальних сфер наукових досліджень є геофізичні дослідження свердловин [2]. Каротаж розширив можливості отримання відомостей про пластові флюїди, такі як вільна та зв'язана вода, а також газ та нафта в режимі реального часу.

У пристроях для проведення каротажу, що заснований на явищі ядерного магнітного резонансу, виникає потреба у формуванні зондувального сигналу складної форми [1], що являє собою високочастотні імпульси збудження атомів речовин, які досліджуються.

Метою роботи є синтез пасивної частини схеми випромінювача системи ядерного магнітного резонансу за допомогою різних методів. Для отримання зондувального сигналу з необхідним гармонічним складом на основі порівняльного аналізу потрібно вибрати найприйнятнішу схему.

Канонічні методи синтезу пасивних фільтрів

Розглянемо чотири канонічні методи синтезу схем [4], що визначають чотири методи розкладу вхідної функції. Кілька різних схем різної структури можуть відповідати одному операторному виразу, що прийнятий в якості вихідного

при синтезі. Тому з відомих рішень необхідно вибрати найбільш прийнятне, керуючись масогабаритними, вартісними та іншими критеріями.

Математичний опис зондувальної напруги, яку необхідно сформулювати на випромінювачі [5]:

$$s(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t,$$

$$s(t) = A_0 \left[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right].$$

В загальному випадку зондувальну напругу можна представити у вигляді:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t)$$

$$s_1(t) = A_1 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos \omega_0 t$$

$$s_2(t) = A_2 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(\omega_0 + \Omega)t$$

$$s_3(t) = A_3 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(\omega_0 - \Omega)t$$

Тобто зондувальний сигнал містить три гармоніки з частотами $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 - \Omega$.

Запишемо операторне зображення відповідних функцій:

$$S(p) = S_1(p) + S_2(p) + S_3(p)$$

$$S_1(p) = \frac{p + 1/\tau}{(p + 1/\tau)^2 + \omega_0^2}$$

$$S_2(p) = \frac{p + 1/\tau}{(p + 1/\tau)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2}$$

$$S_3(p) = \frac{p + 1/\tau}{(p + 1/\tau)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2}$$

Функція $S(p)$ має шість комплексно спряжених коренів виду: $p_i = m \pm j \cdot n$.

Розглянемо розклад функції $S(p)$ на прості дробі – послідовна схема Форстера, при цьому зробимо заміну $p + 1/\tau = p'$.

$$S(p') = \frac{p'}{p'^2 + \omega_0^2} + \frac{p'}{p'^2 + (\omega_0 + \Omega)^2} + \frac{p'}{p'^2 + (\omega_0 - \Omega)^2} \quad (1)$$

Даному розкладу відповідає схема, зображена на рис. 1.

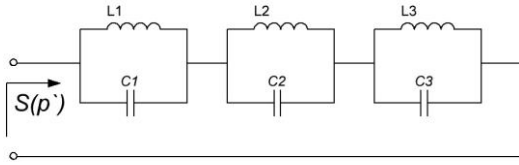


Рис. 1. Синтезована схема по послідовному методу Форстера

$$Y(p') = \frac{(p'^2 + \omega_0^2) \cdot (p'^2 + (\omega_0 + \Omega)^2) \cdot (p'^2 + (\omega_0 - \Omega)^2)}{p' \left[(p'^2 + (\omega_0 + \Omega)^2) \cdot (p'^2 + (\omega_0 - \Omega)^2) + (p'^2 + \omega_0^2) \cdot (p'^2 + (\omega_0 + \Omega)^2) + (p'^2 + \omega_0^2) \cdot (p'^2 + (\omega_0 - \Omega)^2) \right]}$$

Розглянемо $Y(p')/p'$ та замінимо $p'^2 = p''$:

$$\frac{Y(p')}{p'} = \frac{(p'' + \omega_0^2) \cdot (p'' + (\omega_0 + \Omega)^2) \cdot (p'' + (\omega_0 - \Omega)^2)}{p'' \left[(p'' + (\omega_0 + \Omega)^2) \cdot (p'' + (\omega_0 - \Omega)^2) + (p'' + \omega_0^2) \cdot (p'' + (\omega_0 + \Omega)^2) + (p'' + \omega_0^2) \cdot (p'' + (\omega_0 - \Omega)^2) \right]}$$

$$\frac{Y(p')}{p'} = K_0 + \frac{K_1}{p'' + a_1} + \frac{K_2}{p'' + a_2} + \frac{K_3}{p''}$$

Повернемося до змінної p' :

$$Y(p') = K_0 \cdot p' + \frac{K_1 \cdot p'}{p'^2 + a_1} + \frac{K_2 \cdot p'}{p'^2 + a_2} + \frac{K_3}{p'}$$

Синтезована схема має вигляд:

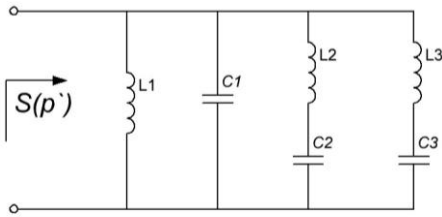


Рис. 2. Синтезована схема по паралельному методу Форстера

Схема містить три паралельні коливальні контури, кожен з яких налаштований на частоту однієї з гармонік.

Для того, щоб синтезувати схему по паралельному методу Форстера необхідно представити провідність $1/S(p') = Y(p')$ у вигляді суми простих дробів.

Недоліком даної схеми є складність забезпечення індуктивного характеру навантаження через наявність конденсатора на вході схеми. Так як на виході інвертора формується ступінчата напруга, що прикладається відразу до конденсатора C1.

Синтез по методу Кауера пов'язаний з розкладом операторної функції в неперервний дріб.

Застосуємо метод Кауера по спадаючим показникам. Для цього перепишемо (1) та зведемо до спільного знаменника:

$$S(p') = \frac{3 \cdot p'^5 + p'^3 \cdot (4 \cdot \Omega^2 + 4 \cdot \Omega \cdot \omega_0 + 6 \cdot \omega_0^2) + p'(\Omega^2 - 4 \cdot \Omega^3 \cdot \omega_0^2 + 8 \cdot \Omega^2 \cdot \omega_0^2 - 4 \cdot \Omega \cdot \omega_0^3 + 3 \cdot \omega_0^4)}{p'^6 + p'^4(2 \cdot \Omega^3 + 3 \cdot \omega_0^2) + p'^2(\Omega^4 + 3 \cdot \omega_0^4) + (\omega_0^6 - 2 \cdot \Omega^2 \cdot \omega_0^4 + \Omega^4 \cdot \omega_0^2)}$$

Перепишемо $S(p')$ для зручності математичних операцій в наступному вигляді:

$$S(p') = \frac{a_5 \cdot p'^5 + a_3 \cdot p'^3 + a_1 \cdot p'}{b_6 \cdot p'^6 + b_4 \cdot p'^4 + b_2 \cdot p'^2 + b_0}$$

Рівність нулю a_0 або a_{2k} визначає тип вхідного опору. Оскільки в даному випад-

ку $a_0 = a_{2k} = 0$, то маємо тип T2, при цьому

$$S(p') = \frac{N_{\text{непарний}}}{D_{\text{парний}}}, n_N < n_D.$$

Виконаємо ділення чисельника на знаменника:

Таблиця 1.

$b_6 \cdot p'^6 + b_4 \cdot p'^4 + b_2 \cdot p'^2 + b_0$	$a_5 \cdot p'^5 + a_3 \cdot p'^3 + a_1 \cdot p'$	$0 \rightarrow Z$
$a_5 \cdot p'^5 + a_3 \cdot p'^3 + a_1 \cdot p'$	$b_6 \cdot p'^6 + b_4 \cdot p'^4 + b_2 \cdot p'^2 + b_0$	$\frac{b_6}{a_5} p' \rightarrow Y$
$(b_4 - \frac{a_3 \cdot b_6}{a_5}) p'^4 + (b_2 - \frac{a_1 \cdot b_6}{a_5}) p'^2 +$	$a_5 \cdot p'^5 + a_3 \cdot p'^3 + a_1 \cdot p'$	$\frac{a_5}{b_4 - a_3 \cdot b_6 / a_5} p' \rightarrow Z$
$\left[a_3 - \frac{a_5 (b_2 - a_1 \cdot b_6 / a_5)}{b_4 - a_3 \cdot b_6 / a_5} \right] p'^3 +$ $\left[a_1 - \frac{a_5 \cdot b_0}{b_4 - a_3 \cdot b_6 / a_5} \right] p'$	$(b_4 - \frac{a_3 \cdot b_6}{a_5}) p'^4 +$ $+(b_2 - \frac{a_1 \cdot b_6}{a_5}) p'^2 + b_0$	
Перепишемо, ввівши нові змінні:		
$m_3 \cdot p'^3 + m_1 \cdot p'$	$n_4 \cdot p'^4 + n_2 \cdot p'^2 + n_0$	$\frac{n_4}{m_3} p' \rightarrow Y$
$(n_2 - \frac{m_1 \cdot n_4}{m_3}) p'^2 + n_0$	$m_3 \cdot p'^3 + m_1 \cdot p'$	$\frac{m_3}{n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3} p' \rightarrow Z$
$(m_1 - \frac{n_0 \cdot m_3}{n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3}) p'$	$(n_2 - \frac{m_1 \cdot n_4}{m_3}) p'^2 + n_0$	$\frac{(n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3) p'}{m_1 - n_0 \cdot m_3 / (n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3)} \rightarrow Y$
n_0	$(m_1 - \frac{n_0 \cdot m_3}{n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3}) p'$	$(\frac{m_1}{n_0} - \frac{m_3}{n_2 - m_1 \cdot n_4 / m_3}) p' \rightarrow Z$

Синтезована схема за методом Кауера по спадаючим показникам матиме вигляд (рис. 3)

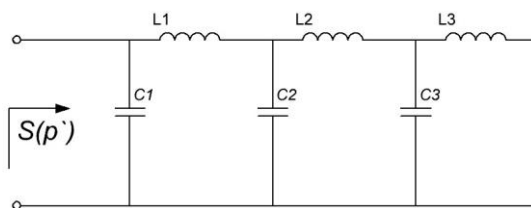


Рис. 3. Синтезована схема по методу Кауера по спадаючим показникам

Недоліком цієї схеми, як і попередньої, є наявність на вході конденсатора.

Виконаємо синтез схеми по методу Кауера по зростаючим показникам. Для цього також виконаємо ділення чисельника на знаменник дробу передавальної операторної функції.

Таблиця 2.

$b_0 + b_2 \cdot p'^2 + b_4 \cdot p'^4 + b_6 \cdot p'^6$	$a_1 \cdot p' + a_3 \cdot p'^3 + a_5 \cdot p'^5$	$0 \rightarrow Z$
$a_1 \cdot p' + a_3 \cdot p'^3 + a_5 \cdot p'^5$	$b_0 + b_2 \cdot p'^2 + b_4 \cdot p'^4 + b_6 \cdot p'^6$	$\frac{b_0}{a_1 \cdot p'} \rightarrow Y$
$(b_2 - \frac{a_3 \cdot b_0}{a_1})p'^2 + (b_4 - \frac{a_5 \cdot b_0}{a_1})p'^4 + b_6 \cdot p'^6$	$a_1 \cdot p' + a_3 \cdot p'^3 + a_5 \cdot p'^5$	$\frac{a_1}{(b_2 - \frac{a_3 \cdot b_0}{a_1}) \cdot p'} \rightarrow Z$
$\left[a_3 - \frac{a_1(b_4 - \frac{a_5 \cdot b_0}{a_1})}{b_2 - \frac{a_3 \cdot b_0}{a_1}} \right] p'^3 + (a_5 - \frac{a_1 \cdot b_6}{b_2 - \frac{a_3 \cdot b_0}{a_1}}) p'^5$	$(b_2 - \frac{a_3 \cdot b_0}{a_1})p'^2 + (b_4 - \frac{a_5 \cdot b_0}{a_1})p'^4 + b_6 \cdot p'^6$	
Перепишемо, ввівши нові змінні:		
$m_3 \cdot p'^3 + m_5 \cdot p'^5$	$n_2 \cdot p'^2 + n_4 \cdot p'^4 + n_6 \cdot p'^6$	$\frac{n_2}{m_3 \cdot p'} \rightarrow Y$
$(n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3})p'^4 + n_6 \cdot p'^6$	$m_3 \cdot p'^3 + m_5 \cdot p'^5$	$\frac{m_3}{(n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}) \cdot p'} \rightarrow Z$
$(m_5 - \frac{m_3 \cdot n_6}{n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}})p'^5$	$(n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3})p'^4 + n_6 \cdot p'^6$	$\frac{n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}}{(m_5 - \frac{m_3 \cdot n_6}{n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}}) \cdot p'} \rightarrow Y$
$n_6 \cdot p'^6$	$(m_5 - \frac{m_3 \cdot n_6}{n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}})p'^5$	$\left[\frac{m_5 - \frac{m_3}{n_4 - \frac{m_5 \cdot n_2}{m_3}}}{n_6} \right] \frac{1}{p'} \rightarrow Z$

Схема, що відповідає розкладу по методу Кауера по зростаючим показникам, зображена на рис. 4.

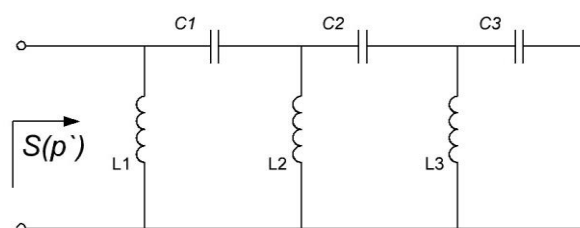
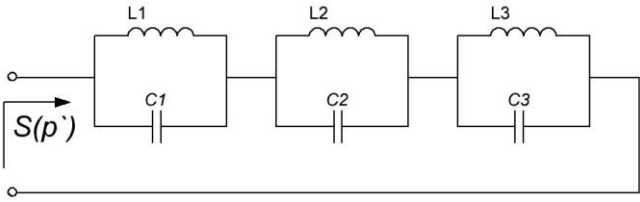
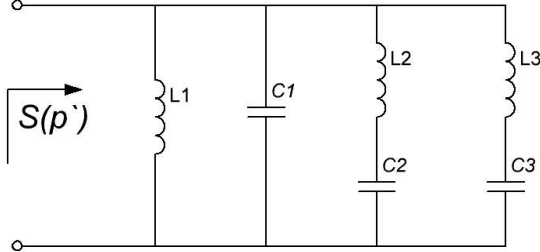
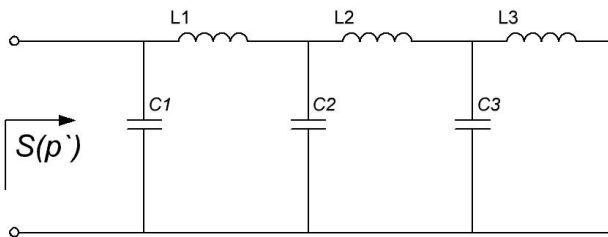
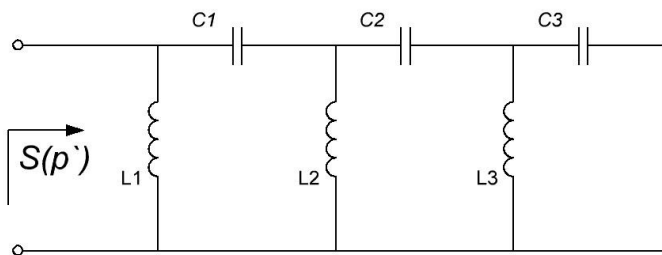


Рис. 4. Синтезована схема по методу Кауера по зростаючим показникам

Зведемо результати синтезу в таблицю 3.

Таблиця 3.

№ п.п.	Назва методу синтезу	Синтезована схема
1.	Послідовний метод Форстера	
2.	Паралельний метод Форстера	
3.	Метод Кауера по спадаючим показникам	
4.	Метод Кауера по зростаючим показникам	

Всі схеми містять шість реактивних елементів, тому на резонансній характеристиці буде п'ять резонансів, що негативно вплине на роботу всієї системи при підлаштування частоти [3]. Для зменшення масогабаритних показників та кількості резонансів в схемі необхідно залишити лише два LC-контури. Отримана схема дозволить забезпечити індуктивну реакцію навантаження. Найбільш доцільно використовувати схему № 3, при цьому дещо видозмінивши її (рис. 5).

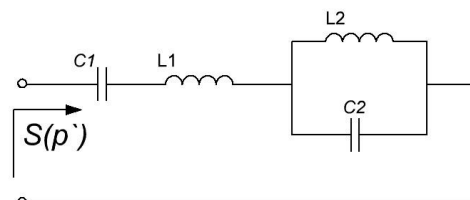


Рис. 5. Видозмінена схема навантаження

Однак, синтезована схема буде реалізовувати тільки дві передавальні функції з трьох. Тому для отримання необхідної форми напруги потрібно змінювати імпульсну послідовність на виході інвертора, що дозволить змінювати гармонічний склад зондувальної напруги та амплітуду його складових.

Висновки

За допомогою канонічних методів синтезу пасивних фільтрів Кауера та Форстера отримано схеми випромінювача для отримання зондувального сигналу необхідної форми. Вказані недоліки та переваги даних схем. На основі порівняння запропоновано використовувати схему, синтезовану по методу Кауера за спадаючими показниками дещо змінивши її.

Список використаних джерел

1. Erwin Hahn. Physical Review. 80(4): pp. 580-594 (1950).
2. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. NMR Logging, Principles and Applications// Halliburton Energy Services, USA 1999.
3. *Заграничний А.В.* Особливості частотних характеристик пристроїв для ядерного магнітного резонансу// Електроніка і зв'язок.– 2014. – №3.–27 с.
4. *Ортюзи Ж.*, Теория электронных цепей. Том 2. Синтез.// Мир. – 1971. – 137-162 с.
5. *Рогаль В.В., Заграничний А.В.* Способы формирования зондувальної напруги в пристроях ядерного магнітного резонансу// Електроніка і зв'язок.– 2013. – №5.–19 с.

Поступила в редакцию 29 июля 2016 г.

УДК 621.391.8

А.В. Заграничный

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Проспект Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина.

Синтез пассивных фильтров для системы ядерного магнитного резонанса

В данной статье рассмотрены методы синтеза Кауэра и Форстера пассивных фильтров для системы ядерного магнитного резонанса. Приведены преимущества и недостатки полученных схем. На основе сравнительного анализа указано на целесообразность использования схемы, полученной с помощью метода Кауэра по спадающим показателям. Отмечена необходимость уменьшения количества реактивных элементов в схемах и корректировки спектрального состава напряжения на выходе инвертора. Библ. 5, рис. 5, табл. 3.

Ключевые слова: зондирующий сигнал; метод синтеза; передаточная функция; пассивный фильтр; колебательный контур.

UDC 621.391.8

A. Zagrychnyi

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

Synthesis of passive filters for nuclear magnetic resonance system

The Kauer's and Forster's methods of synthesis passive filter for nuclear magnetic resonance system in this article are reviewed. Advantages and disadvantages of obtained circuits are shown. Based on comparative analysis the feasibility of using the scheme obtained by the Kauer's method in descending indexes are considered. Comments on the need to reduce the amount of reactive elements in the schemes and adjusting the spectral composition of output voltage of the inverter. Referense 5, Figures 5, Tables 3.

Keywords: probe signal; synthesis method; Transmission function; passive filter; oscillatory circuit.

Reference

1. *Erwin Hahn*. (1950) *Physical Review*. 80(4): pp. 580-594.
2. *George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer*. (1999) *NMR Logging, Principles and Applications*. Halliburton Energy Services.
3. *Zagranychnyi A.V.* (2014). Features of the frequency characteristics of devices for nuclear magnetic resonance. *Electronics and Communications*, no. 3, P. 27. (Ukr)
4. *J. Ortusi*, (1971). *Theory of electronic circuits*. Volume 2. Synthesis. Myr, P. 137. (Rus)
5. *Rogal V.V., Zagranychnyi A.V.* (2013). Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic resonance. *Electronics and Communications*, no. 5, P. 19. (Ukr)